

文章编号: 1000-0887(2006) 07-0845-07

危岩主控结构面损伤模型研究^{*}

陈洪凯^{1,2}, 唐红梅², 叶四桥²

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

(谢和平推荐)

摘要: 危岩是迄今研究程度极其薄弱的地质灾害类型, 而主控结构面受荷损伤是危岩发育机理研究的核心技术. 通过定义主控结构面裂端损伤区, 运用损伤力学方法建立了裂端损伤区的即时泊松比和即时弹性模量的计算方法, 并据此构建了主控结构面裂端损伤本构方程, 为主控结构面断裂演化数值模拟奠定了理论基础.

关键词: 危岩; 主控结构面; 损伤区; 损伤模型; 应用

中图分类号: P642. 23; O346. 5; P642. 21 **文献标识码:** A

引 言

危岩(perilous rock)是指位于陡崖或陡坡上被岩体结构面切割且稳定性较差的岩块, 按照失稳模式可将其分为滑塌式危岩、倾倒式危岩和坠落式危岩 3 类^[1,2](图 1~ 图 3). 危岩是三峡库区主要地质灾害类型, 具有分布面广、稳定性差、致灾严重等特性^[1~3], 在我国西部高山深谷区的公路边坡及斜坡地带也广泛分布. 迄今, 危岩发育机理是危岩研究的关键, 而研究危岩发育机理的核心是主控结构面的形成及发展^[4]. 将危岩体后部贯通或断续贯通且力学强度较低的面(或带)定义为主控结构面(control fissure), 其非线性失稳扩展是危岩失稳的根本原因, 而主控结构面失稳扩展则源于裂端区的损伤发育.

目前, 国内外学者对岩体及混凝土等脆性材料的损伤特性研究主要集中在损伤变量及量测、损伤模型等方面^[5~12], 提出了根据损伤截面积占断面积比例的经典损伤变量^[5], 开发了电阻率法、超声衰减技术、声发射技术、光学技术积显微技术等损伤变量量测技术^[5~11], 比较全面地建立了 Mazars 损伤模型、Loland 损伤模型、分段线性损伤模型、分段曲线损伤模型、一维纤维束损伤模型、Frantziskonis_Desai 损伤模型及 Awamoto_Murakami 损伤模型等^[5~12], 这些成果基本构建了脆性岩石损伤理论. 但是, 这些损伤模型均是基于对试块的室内试验建立的, 而危岩位于陡崖或陡坡并且规模一般较大, 体积可及 5 000 m³ 以上, 况且危岩主控结构面难于较准确量测, 其损伤过程受最不利荷载组合控制, 难于通过室内试验进行模拟, 这也是目前国内外危

* 收稿日期: 2004_09_28; 修订日期: 2006_03_30

基金项目: 重庆市重点自然科学基金资助项目(2005BA7008); 高等学校重点实验室访问学者基金资助项目(200310)

作者简介: 陈洪凯(1964—), 男, 重庆人. 教授, 博士, 博士生导师(联系人. Tel/Fax: + 86_23_62652719; E_mail: Bialik@163.net; Rxzj@yahoo.com)•

岩研究进展极其缓慢的主要原因。本文根据在危岩控制性荷载组合作用下危岩的蠕变试验,研究危岩主控结构面损伤模型。

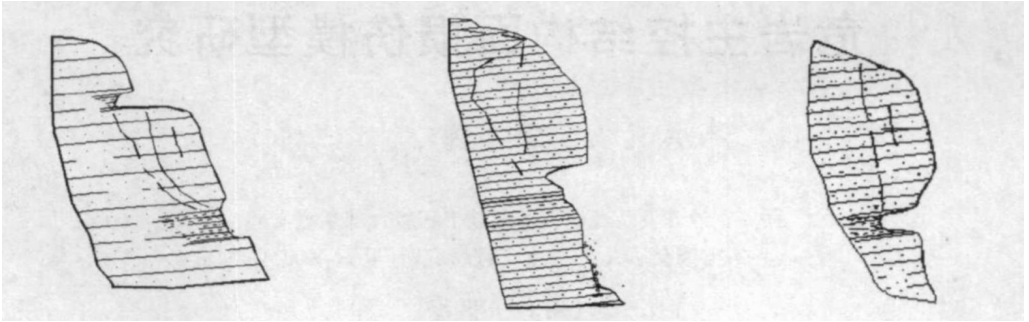


图1 滑塌式危岩

图2 倾倒式危岩

图3 坠落式危岩

1 主控结构面裂端损伤区

由于危岩多发育在砂岩、灰岩等脆性岩体内,为了研究主控结构面裂端损伤发展问题,必须解决裂端损伤集中发育的区域大小,以便在该区域中应用连续介质损伤力学的模型及方程求解损伤问题,并顺利和断裂机理相耦合。在一般损伤力学中,将裂端区域分为无损区、连续损伤区和损伤局部化带^[12](图4),据此思路,本文假定危岩主控结构面裂端损伤发育区域为一个半径为 R 的圆(图5)。

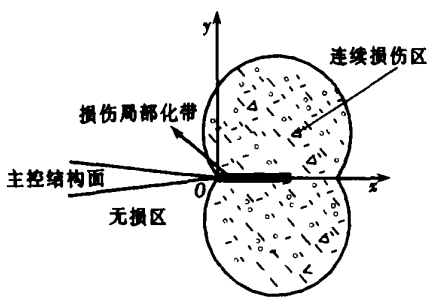
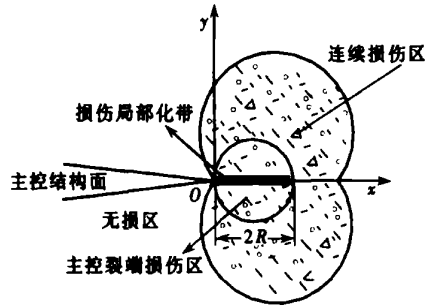
图4 裂端末部的损伤区划分^[12]

图5 危岩主控结构面裂端损伤区划分

对于危岩主控结构面,可以认为是半无限长裂纹的平面应变问题,将坐标原点建在结构面尖端(图5)。假定在主控结构面尖端发生应力跌落的损伤区长度为 $2R$,它与远场的应力强度因子有关且 R 远小于裂纹尺寸,即认为损伤范围很小,不影响远场的应力分布。则在远场拉应力 σ_∞ 作用下的应力强度因子为

$$K_{I\infty} = \sigma_\infty \sqrt{\pi e} \quad (1)$$

在 $x = \xi (\xi < 0)$ 处作用一对集中力 $\tilde{\sigma}(\xi) d\xi$ 时,产生的应力强度因子为

$$dK_D = - \frac{2\tilde{\sigma}(\xi)}{\sqrt{2\pi(-\xi)}} d\xi \quad (2)$$

则由损伤区内的分布力产生的应力强度因子为

$$K_D = \int_{-2R}^0 - \frac{2\tilde{\sigma}(\xi)}{\sqrt{2\pi(-\xi)}} d\xi \quad (3)$$

由于 $x = 0$ 附近的应力有限,应有

$$K_{I\infty} + K_D = 0 \quad (4)$$

即

$$\int_0^{2R} -\frac{2\tilde{\sigma}(-\xi)}{\sqrt{2\pi\xi}} d\xi = K_{I\infty} \quad (5)$$

对于弹脆性模型, 假设损伤区内应力为常数 σ_0 分布时, 得到损伤区半径 R 为

$$R = \frac{\pi}{16} \left(\frac{K_{I\infty}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (6)$$

假设损伤区内的应力呈线性分布时

$$\tilde{\sigma}(x) = \frac{R+x}{R} \sigma_0 \quad (-R \leq x \leq 0), \quad (7)$$

得到损伤区半径 R 为

$$R = \frac{9\pi}{16} \left(\frac{K_{I\infty}}{\sigma_0} \right)^2, \quad (8)$$

式中, σ_0 为裂端应力, $\tilde{\sigma}$ 为损伤区应力, e 指裂纹长度, ξ 为 x 轴上任意坐标值。

随着主控结构面的失稳扩展, 损伤区将随着断裂过程和时间的推进而扩展直至阈值而发生失稳断裂。

2 主控结构面损伤模型

对于脆性岩石, 岩石的细观裂纹体积密度 Q_d 可以较好的反映细观裂纹损伤的状态特征, 故在脆性岩石的损伤研究中, 可以选取 Q_d 作为与细观裂纹损伤相关的内状态变量^[13]。采用扫描窗的方法^[13], 在观察面上测定了危岩体主控结构面裂端砂岩试样的细观裂纹(平面)密度 Q_a 。共对三峡库区万州太白岩危岩区砂岩测试了6组试样, 运用 $Q_d = Q_a^{3/2}$ 计算了细观裂纹的体积密度 Q_d , 根据 Q_d 便可求得砂岩初始内状态变量, 进而获取其初始损伤量如损伤度。太白岩危岩砂岩典型蠕变试验曲线见图6。在第一阶段应变基本随时间线性增长, 但很快便进入第二阶段即稳定蠕变阶段, 这一阶段历时较长, 应变随时间的增长很微弱和缓慢, 当进入第三阶段时, 应变便发生突变式增长随即试件破坏。对应于内部损伤累积过程而言, 第一阶段内岩石损伤发展缓慢, 试样处于被压密阶段甚至内部部分微裂纹发生闭合; 第二阶段损伤发育较快, 损伤不断积聚和积累, 当达到损伤的阈值时, 便迅速进入第三阶段即损伤失稳阶段。

选用弹性模量作为中间变量, 定义损伤变量为

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E}, \quad (9)$$

式中, D 为损伤变量(损伤度), \tilde{E} 为材料的即时弹性模量(各时间点的有效弹性模量), E 为材料的初始弹性模量。

为了将 E 和 Q_d 联系起来, 本文采用文献[13]基于对花岗岩、砂岩等典型脆性岩石试验建立的关系式

$$\frac{\tilde{E}}{E} = 1 - \frac{2 - \tilde{\nu}}{1 - \tilde{\nu}} Q_d, \quad (10)$$

且有

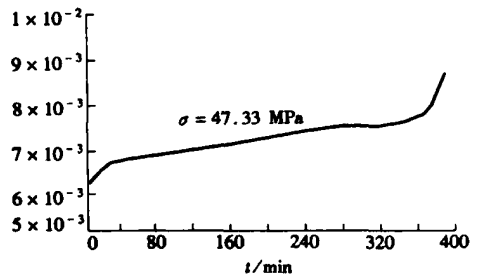


图6 太白岩砂岩典型蠕变实验曲线

$$Q_d = \frac{1}{12\nu} \frac{\tilde{\nu} - \nu}{3 - \tilde{\nu}} \quad (11)$$

式中, ν 为材料的初始泊松比, $\tilde{\nu}$ 为材料的即时泊松比。

联合(9)式和(10)式得

$$D = \frac{2 - \tilde{\nu}}{1 - \tilde{\nu}} Q_d \quad (12)$$

根据细观裂纹的几何特征及体积比概念, 随机分布的细观裂纹的特征体积与特征长度成正比, 故 Q_d 可以表示为

$$Q_d = \zeta N a^3, \quad (13)$$

式中, ζ 为材料系数, N 为单位体积内的裂纹数, a 为细观裂纹的特征长度。

对于脆性岩石, 细观层次上与新裂纹表面形成相关的能量释放率要高于因塑性变形而产生的能量释放率, 故由线弹性断裂力学可以得到加载条件下裂纹的特征长度

$$a = \frac{A}{\pi E^2} \left[\frac{K_{Ic}}{\varepsilon} \right]^2, \quad (14)$$

式中, A 为裂纹形状和材料泊松比相关的系数, K_{Ic} 为平面应变断裂韧度。

另根据 Grady 和 Kipp 的研究, 单位体积内的细观裂纹数 N 服从于 Weibull 分布^[12], 即有

$$N = B \varepsilon^n, \quad (15)$$

式中, B 、 n 均为材料常数。

将(13)式~(15)式代入(12)式得

$$D = \frac{2 - \tilde{\nu}}{1 - \tilde{\nu}} \zeta B \left[\frac{AK_{Ic}^2}{\pi E^2} \right]^3 \varepsilon^{n-6}. \quad (16)$$

定义 $C = [(2 - \tilde{\nu}) / (1 - \tilde{\nu})] \zeta B [AK_{Ic}^2 / (\pi E^2)]^3$ 为“损伤系数”, 它是对细观裂纹损伤与应变之间相关关系的综合反映。则(16)式可以简记为

$$D = C \varepsilon^{n-6}. \quad (17)$$

根据损伤力学中经典的应变等效性假定^[12], 有

$$\sigma = \tilde{E} \varepsilon = E(1 - D) \varepsilon \quad (18)$$

将(17)式代入(18)式即可得到细观裂纹损伤本构模型即主控结构面裂端损伤本构方程

$$\sigma = E \varepsilon - EC \varepsilon^{n-5}, \quad (19)$$

式中, 系数 C 和 n 可以通过岩石试样的常规单轴压缩应力-应变全过程曲线的峰值点 $P(\sigma_p, \varepsilon_p)$ 求得, 即

由 $(d\sigma/d\varepsilon)|_p = 0$, 可得

$$1 - C(n-5) \varepsilon_p^{n-6} = 0, \quad (20)$$

且 $P(\sigma_p, \varepsilon_p)$ 点满足(19)式, 则

$$\sigma_p = E \varepsilon_p - EC \varepsilon_p^{n-5}. \quad (21)$$

由(20)式整理得

$$C = \frac{\varepsilon_p^{6-n}}{n-5}. \quad (22)$$

把(22)式代入(21)式, 则

$$\sigma_p = E \varepsilon_p - \frac{E \varepsilon_p^{6-n}}{n-5} \times \varepsilon_p^{n-5}, \quad (23)$$

整理得

$$n = \frac{6E\varepsilon_p - 5\sigma_p}{E\varepsilon_p - \sigma_p}, \quad (24)$$

$$C = \frac{\varepsilon_p^{5-n}}{E} (E\varepsilon_p - \sigma_p). \quad (25)$$

通过(16)式将损伤变量 D 与材料应变 ε 联系起来后,使(18)式表达的损伤模型不仅可以用于脆性岩石的弹性细观裂纹损伤分析,而且还适用于评估与时间相关的细观裂纹损伤。

脆性岩石的单轴蠕变本构关系可用下式描述

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \alpha \varepsilon^{-\zeta} \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^\delta, \quad (26)$$

式中, α 、 ζ 、 δ 为材料常数; σ_c 为岩石的单轴抗压强度。利用初始条件 $\varepsilon|_{t=t_0} = \varepsilon_a$ 以及蠕变时间 t_c , 对(22)式进行积分得

$$\varepsilon = \varepsilon_a \left[\frac{t - t_0}{t_c} + 1 \right]^{1/(\zeta+1)}, \quad (27)$$

$$t_c = \left[\frac{\alpha(\zeta+1)}{\varepsilon_a^{\zeta+1}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^\delta \right]^{-1}. \quad (28)$$

把(27)式代入(16)式可得到恒载条件下脆性岩石细观裂纹蠕变损伤演化规律

$$D = D_a \left[\frac{t - t_0}{t_c} + 1 \right]^{(n-6)/(\zeta+1)}, \quad (29)$$

式中

$$D_a = D|_{t=t_0} = C\varepsilon_a^{n-6}. \quad (30)$$

联立(10)式和(11)式可得

$$(12D\nu + 1)\tilde{\nu}^2 - (48D\nu + \nu + 2)\tilde{\nu} + (36D + 2)\nu = 0. \quad (31)$$

通过(31)式可求出即时泊松比 $\tilde{\nu}$, 由(11)式求解细观裂纹体积密度 Q_d , 则通过(10)式便可解算主控结构面裂端损伤区的即时弹性模量 \tilde{E} 。

3 损伤模型工程应用

以重庆市万州区太白岩危岩为例,危岩体由砂岩组成,砂岩呈灰色、灰白色,中细粒结构,泥钙质胶结,岩质坚硬,为长石砂岩与长石石英砂岩。天然状态下主要物理力学参数:天然容重 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, 容许抗拉强度 $\sigma_t = 500 \text{ kPa} \sim 600 \text{ kPa}$, 弹性模量 $E = 8300 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.16$, 岩体强度指标 $c = 1790 \text{ kPa}$, $\varphi = 34.3^\circ$, 主控结构面强度指标 $c = 100 \text{ kPa}$, $\varphi = 20^\circ$, 天然状态单轴抗压强度 $\sigma_c = 52.92 \text{ MPa}$ 。

3.1 单调加载条件下损伤分析

由砂岩试样的应力-应变关系曲线(图7)可以得到试样破坏临界点 P 的临界应力 $\sigma_p = 52.1 \text{ MPa}$ 、临界应变 $\varepsilon_p = 6.83 \times 10^{-3}$ 。

将 E 、 σ_p 、 ε_p 代入(24)式和(25)式得到 $n = 17.35$, $C = 2.967 \times 10^{23}$, 将 n 、 C 值代入(19)式则可建立损伤本构方程为

$$\sigma = 8300\varepsilon - 2.46 \times 10^{27} \varepsilon^{12.35}. \quad (32)$$

通过方程(32)可以通过实验测定的任意时刻的应变预测任意时刻的应力状况,甚至是整个应力-应变过程曲线。预测的 σ - ε 曲线与实测 σ - ε 曲线对比情况见图8,可见,该损伤模型不仅和实测曲线吻合较好,而且还可以预测出峰值点后砂岩软化阶段的应力-应变关系曲线。

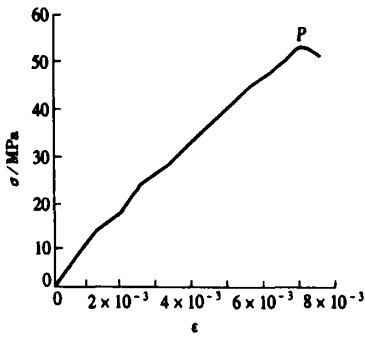


图7 砂岩试样应力_应变关系曲线

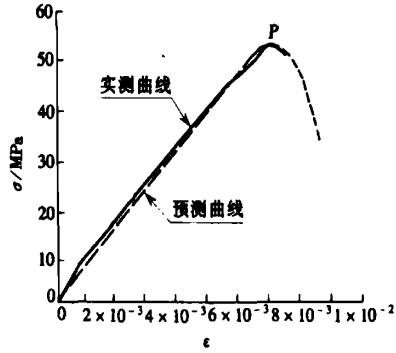


图8 砂岩蠕变模型预测曲线与实测曲线的对比

3.2 蠕变损伤分析

对砂岩试样, 瞬时加载到 47.33 MPa, 并保持恒定。 $t = t_0 = 1$ s 时, 测得其应变值 $\varepsilon_a = 6.24 \times 10^{-3}$; 实验得到该应力水平下的蠕变破坏时间为 $t_c = 2.22 \times 10^4$ s, 蠕变破坏时的应变为 $\varepsilon_c = 7.98 \times 10^{-3}$ 。 将初始应变代入(30)式, 可得到初始损伤度为 $D_a = 0.028$ 。 将蠕变破坏时的应变代入(17)式可得, 破坏时砂岩损伤度为 $D_c = 0.457$ 。 得到了 $t = t_c$ 时刻的损伤度 D_c , 则可以通过式(29)求得 $\zeta = 1.817$ 。 将所有的已知参数代入(27)式得

$$\varepsilon = 6.24 \times 10^{-3} \times (4.5 \times 10^{-5} t + 1)^{0.355} \quad (33)$$

通过(33)式就可以得到蠕变过程中随时间历程的任意时刻应变值, 预测的蠕变曲线同实测蠕变曲线的对比(图9)可见, 蠕变损伤模型所预测的蠕变曲线和实测蠕变实验曲线吻合。

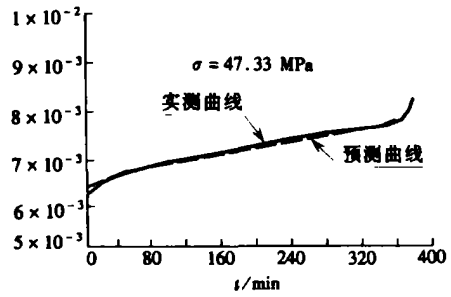


图9 危岩蠕变损伤模型预测曲线与实测曲线对比

4 结 论

1) 作为主要岩土工程病害之一的危岩迄今研究程度不足, 导致防治缺乏针对性、有效性, 危岩主控结构面的损伤、断裂失稳扩展是危岩发育的根本原因, 而主控结构面损伤是其断裂的理论基础。

2) 本文假定危岩主控结构面裂端损伤发育区域为一个半径为 R 的圆, 运用损伤力学推导了损伤区范围大小的求解方法, 建立了主控结构面裂端损伤本构方程, 详细推导并建立了损伤区即时泊松比及即时弹性模量的计算方法。

3) 通过试验建立了岩石蠕变损伤预测方法, 预测值与试验值吻合。

4) 研究成果尤其是损伤区范围及损伤参数, 如即时泊松比和即时弹性模量的确定, 奠定了主控结构面断裂扩展数值模拟的理论基础。

[参 考 文 献]

- (4): 614—619
- [2] 陈洪凯,王蓉. 三峡库区危岩体锚固计算方法及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(4): 59—62.
- [3] 陈洪凯,唐红梅,王蓉,等. 锚固岩体参数的等效方法研究[J]. 应用数学和力学, 2001, 22(8): 862—868.
- [4] 陈洪凯,唐红梅,刘光华,等. 危岩支撑及锚固_支撑联合计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 383—388.
- [5] 袁建新. 岩体损伤问题[J]. 岩土力学, 1993, 14(1): 1—31.
- [6] Chaboche J L. Continuum damage mechanics. part I _general concept[J]. J. of Appl Mech ASME, 1988, 55(1): 59—64.
- [7] Dragon A, Mroz Z. A continuum model for plastic_brittle behaviour of rock and concrete[J]. Int J of Engrg Sci, 1979, 1(17): 121—137.
- [8] Krajcinovic D, Manuel Amerien G. Silva, Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. Int J of Solids and Structure, 1982, 18(7): 551—562.
- [9] Rossmannik H P. Fructure and damage of concrete and rock[J]. Special Issue of Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35: 617—927.
- [10] Kawamoto T, Ichikawa Y, Kyoya T. Deformation and fracture behaviour of discontinuous rock mass and damage mechanics theory[J]. Int J for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1988, 12(1): 1—30.
- [11] Kyoya T, Ichikawa Y, Kawamoto T. A damage mechanics theory for discontinuous rock mass[A]. In: Proc 5th Int Conf Num Mech [C]. Geomech Nagoya, 1985, 1: 469—480.
- [12] 余寿文,冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997, 142—157.
- [13] 凌建明,孙均. 脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 304—312.

Research on Damage Model of Control Fissure in Perilous Rock

CHEN Hong_kai^{1,2}, TANG Hong_mei², YE Si_qiao²

(1. Key Laboratory For the Exploitation of Southwestern Resources & the
Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education,
Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University,
Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: Hitherto, perilous rock is the weakest topic in disaster studies. Specially, damage of control fissure under loads is one key technique in study of developing mechanism of perilous rock. Damage division of end area of control fissure was defined, then calculation methods of timed_Poisson's ratio and timed_Young's modulus were established in damage mechanics theory. Further, the damage constitutive equation of control fissure is set up, which founds important basis to numerical simulation for control fissure to develop.

Key words: perilous rock; control fissure; damage area; damage model; application